

# Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID.

Andrade Cedeño Rogger,  
[rogger.andrade@gmail.com](mailto:rogger.andrade@gmail.com)

**Abstract** — In this project, design and construction of an educational module has been carry out, allowing understand in a practical way, the concepts related to: control system, instrumentation, actuator, programmable logic controller, SCADA system and control algorithm. Module's principal components are main tank, reserve tank, piping system, fittings, differential pressure transducer, turbine flowmeter, rotameter, control valve, solenoid valves, servovalve, centrifugal pump, PLC and a personal computer (PC). With this, automatic flow and water level control were achieve, through the implementation of a PID control algorithm. In the end, operation tests have been perform, generating changes in set point, and generating disturbances, to observe the response of the process and assess the control system.

**Keywords** — control system, instrumentation, flow control, level control, PLC, SCADA, PID controller

## I. RESUMEN

En el presente proyecto se ha realizado el diseño y la construcción de un módulo didáctico, que permite entender de manera práctica, los conceptos relacionados con: sistema de control, instrumentación, actuador, controlador lógico programable, sistema SCADA y algoritmo de control. Los principales componentes del módulos son: tanque principal, tanque de reserva, sistema de tuberías y accesorios; transductor de presión diferencial, medidor de caudal tipo turbina, rotámetro, válvula de control, electroválvulas, servoválvula de perturbaciones, bomba centrífuga, PLC, y un computador personal (PC). Con esto, se ha logrado realizar un control automático de caudal y nivel de agua, mediante la implementación de un algoritmo de control PID. Al final se han realizado pruebas de operación, las cuales consisten en generar cambios del punto de consiga y generar perturbaciones, para observar la respuesta del proceso y valorar el sistema de control.

## II. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control son ampliamente utilizados en la actualidad, encontrándose desde pequeñas aplicaciones domésticas, hasta grandes y complejos procesos industriales; incluso, su aplicación no solo se centra en la ingeniería, sino también en la biología, economía, entre otras disciplinas.

En los sistemas de control de lazo cerrado, la realimentación se la logra mediante la instrumentación, la cual interactúa con una variable física del proceso, como presión, caudal, nivel, temperatura, etc., y envía información al controlador, para que éste ejecute acciones o estrategias de control, de manera que se pueda mantener al proceso dentro de los parámetros previamente establecidos. Los controladores comandan a los actuadores, o elementos finales de control, que pueden ser válvulas, motores, variadores de frecuencia, entre otros. La “inteligencia” de un sistema de control se la logra mediante un algoritmo de control, el cual es ejecutado por los controladores. El algoritmo de control más común, es el algoritmo de control PID.

En aplicaciones industriales, uno de los sistemas de control más utilizados es el sistema SCADA, el cual tiene componentes de hardware y software que permiten supervisar y controlar el proceso industrial.

En la presente investigación se ha desarrollado un módulo didáctico, que permita estudiar y entender de manera práctica, todos los conceptos antes descritos.

## III. MARCO TEÓRICO

### A. Sistema de control en lazo cerrado.

Los sistemas de control se analizan y se diseñan en base a la teoría de control, que es una rama interdisciplinaria de la ingeniería y la matemática que se ocupa del comportamiento de los sistemas dinámicos con entradas, y de cómo su comportamiento es modificado por la retroalimentación. Los sistemas de control han desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, y se han convertido en una parte importante e integral en los procesos modernos de producción y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, nivel, etc. (Ogata, 2010).

Existen dos formas básicas de sistemas de control: en lazo abierto y en lazo cerrado. En el sistema de lazo abierto, la entrada se manipula en base a la experiencia que se tiene sobre el sistema, de manera que a la salida se tenga el valor requerido; sin embargo, la salida no se modifica ante cambios en las condiciones de operación.

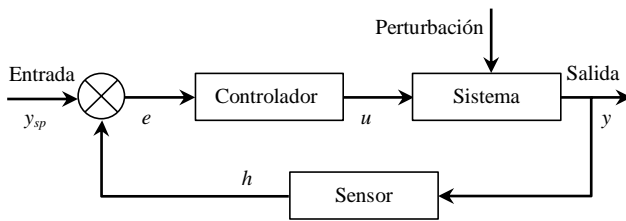
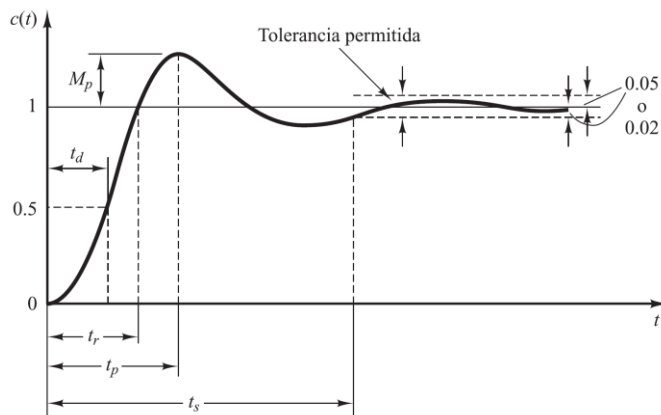


Figura 1: Sistema de control en lazo cerrado

En un sistema de control en lazo cerrado, mostrado en la figura 1, se tiene realimentación hacia la entrada desde la salida, realizándose una comparación cuya diferencia es utilizada como medio de control, de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en la condiciones de operación.

Con frecuencia, las características de desempeño de un sistema de control se especifican en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario, puesto que esta es fácil de generar y suficientemente drástica (Ogata, 2010). La respuesta transitoria de un sistema de control práctico, muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario. Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control para una entrada escalón unitario, es común especificar los siguientes parámetros: tiempo de retardo ( $t_d$ ), tiempo de subida ( $t_r$ ), tiempo pico ( $t_p$ ), sobrepico ( $M_p$ ), tiempo de asentamiento ( $t_s$ ). La curva de respuesta de un sistema de control se muestra en la figura 2.

Figura 2. Curva de respuesta en un sistema de control a una entrada de escalón unitario con  $t_d$ ,  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $M_p$  y  $t_s$ .

### B. Medición de nivel.

Los medidores de nivel son muy importantes en la industria, ya que con ellos se puede llevar un balance adecuado de insumos y productos en el proceso de producción. Existen medidores de nivel destinados a aplicaciones con líquidos y sólidos; y las mediciones de nivel de líquidos se las puede realizar de manera directa, por presión hidrostática, por desplazamiento de flotador, por características eléctricas del líquido; o, por otros métodos como ópticos, vibratorios y dispersión térmica (Creus, 2010). En la presente investigación se describe el tipo de medición mediante presión diferencial, el cual es un subtipo de

la medición por presión hidrostática, por ser este el método seleccionado para el presente proyecto.

El nivel de líquido puede ser medido indirectamente, midiendo la presión diferencial ocasionada por el peso de la columna del fluido en un tanque balanceado con respecto a una referencia. Para tanques abiertos, a presión atmosférica, la entrada de alta presión del medidor es conectada al fondo del tanque, y el lado de baja presión (referencia) se deja libre a la atmósfera (Liptak, 2003).

En un tanque abierto, la presión hidrostática es proporcional a la altura del líquido, en base a la siguiente ecuación:

$$P = \rho \times g \times h + P_o \quad (1)$$

Donde:

$P$	presión absoluta
$P_o$	presión atmosférica
$\rho$	densidad del líquido
$g$	aceleración de la gravedad = $9.8 \text{ m/s}^2$
$h$	altura del líquido sobre el instrumento

Pasando la presión atmosférica al primer miembro se tiene la presión relativa o diferencia de presión:

$$\Delta P = P - P_o = \rho \times g \times h \quad (2)$$

Conocida la presión diferencial, se puede calcular el nivel del líquido ( $h$ ), utilizando la ecuación (2).

### C. Medición de caudal.

La medición de caudal de líquidos y gases es muy común en procesos industriales, laboratorios y plantas piloto. Existen dos tipos generales de estos medidores: volumétricos y másicos, siendo los primeros más utilizados en mediciones generales, mientras los segundos se utilizan en aplicaciones de mayor exactitud (Creus, 2010). Existen diferentes tipos de medidores, basados en diferentes principios de medición; sin embargo, en el presente proyecto se abordan los dos tipos de medidores utilizados: tipo turbina y rotámetro

El medidor tipo turbina, es un medidor volumétrico, que consiste en un conjunto de paletas o aspas acopladas a un eje rotor, de manera que cuando el fluido golpea estas paletas, se produce el giro a una velocidad directamente proporcional al caudal del fluido que circula. La velocidad de rotación es monitoreada por una bobina electromagnética, la cual está ubicada en el exterior de la carcasa del medidor (Liptak, 2003).

Estos medidores son bastante exactos y la máxima precisión se consigue en régimen laminar, para lo cual debe ser instalado en una tubería recta que debe tener como mínimo 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo; además, se debe procurar que el instrumento esté siempre lleno de líquido, aunque el caudal sea cero, ya que velocidades muy altas podrían afectarlo seriamente.

El rotámetro, o también conocido como medidor de área variable, también es del tipo volumétrico, y consiste de un flotador que se mueve libremente dentro de un tubo vertical ligeramente cónico, con el extremo angosto hacia abajo. El fluido entra por la parte inferior del tubo y hace que el flotador suba hasta que el área anular, entre él y la pared del tubo, sea tal que la caída de presión de este estrechamiento sea lo suficiente para equilibrar el peso del flotador. La posición del flotador varía directamente con el caudal (Creus, 2010).

#### D. Válvula de control

El elemento final de control más utilizado en la industria es la válvula de control, la cual manipula el flujo de un fluido, como gas, vapor, agua o compuesto químico, para compensar las perturbaciones y mantener la variable del proceso regulada, tan cerca como fuera posible del punto de consigna deseado (Emerson, 2019).

Una válvula de control está conformada por el cuerpo, las piezas internas de ajuste, el actuador que mueve la válvula, y otra variedad de accesorios que pueden incluir: transductores, fuente de presión, reguladores, amortiguadores o interruptores de límite. Principalmente, existen dos tipos de diseños de válvulas de control, dependiendo del elemento de cierre, que son: válvula de control con vástago deslizante y válvula de control rotativa.

#### E. Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC es un equipo electrónico basado en microprocesador, que nació como una alternativa a los controles eléctricos tradicionales con relés; y aunque inicialmente se lo utilizaba para la automatización de procesos discretos, el avance tecnológico le ha permitido expandirse a los procesos continuos de producción (Love, 2007).

Está conformado por un CPU, interfaces de entrada/salida con los sensores/actuadores del proceso; y, con módulos de comunicación que permiten integrarse a un computador ubicado en el cuarto de control, donde se encuentre el operador del proceso.

Los PLCs modernos se pueden programar por lenguajes de programación de alto nivel (diagrama ladder, diagrama de bloques) o de bajo nivel (lista de instrucciones, texto estructurado).

#### F. Algoritmo de control PID

El controlador PID es el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo, o con pequeñas variaciones de éste (Astrom y Hagglund, 2009). El algoritmo PID puede ser descrito matemáticamente, de la siguiente manera:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Donde  $u$  es la variable de control y  $e$  es el error de control ( $e = y_{sp} - y$ ). La variable de control es la suma de tres términos: El término  $P$  (que es proporcional al error), el término  $I$  (que es proporcional a la integral del error), y el término  $D$  (que es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional  $K$ , el tiempo integral  $T_i$ , y el tiempo derivativo  $T_d$ .

National Instrument (2014), explica el efecto de las componentes proporcional, integral y derivativa de un algoritmo PID, en la respuesta de un sistema. La componente proporcional únicamente depende del error, el cual es la diferencia entre el punto de consigna (set-point) y la variable del proceso. La ganancia proporcional ( $K_c$ ) determina la relación de la respuesta de salida con respecto al error. Por ejemplo, si el error tiene una magnitud de 10, una  $K_c$  de 5 generará una respuesta proporcional de 50. En general, incrementando  $K_c$  se incrementará la velocidad del sistema y también disminuirá el error de estado estacionario, el cual es la diferencia final entre la variable del proceso y el set-point. Sin embargo, si  $K_c$  es muy grande, la variable del proceso comenzará a oscilar. Si  $K_c$  se incrementa demasiado, las oscilaciones serán cada vez más grandes y el sistema se volverá inestable.

La componente integral tiene como propósito integrar el error en el tiempo para minimizar el error de estado estable. Por lo tanto, la respuesta integral continuará incrementando con el tiempo a menos que el error sea cero. Sin embargo, la acción integral puede causar un sobrepico, oscilación, y/o problemas de inestabilidad si  $T_i$  es muy pequeña. Valores más pequeños de  $T_i$  tendrán un efecto integral más fuerte en la respuesta del sistema.

La componente derivativa del algoritmo PID anticipa el comportamiento futuro del error, por lo que la respuesta de la componente derivativa es proporcional a la tasa de cambio del error. Por lo tanto, en general la acción derivativa previene el sobrepico y elimina las oscilaciones. Por otro lado, la mayoría de sistemas de control prácticos utilizan una ganancia derivativa  $T_d$  muy pequeña por que la respuesta derivativa es altamente sensible al ruido en la señal de la variable del proceso. Si la señal del sensor de retroalimentación, la cual representa la variable del proceso, es ruidosa; la componente derivativa puede hacer el sistema de control inestable.

Los valores adecuados de los parámetros del controlador PID, determinaran su correcto funcionamiento; por lo que, una selección inadecuada de parámetros, podría provocar un control inestable susceptible a oscilaciones y fallas. Dos métodos clásicos para determinar los parámetros de controladores PID fueron presentados por Ziegler y Nichols en 1942, los cuales aún son ampliamente utilizados en su forma original o en algunas de sus modificaciones (Astrom et.al, 2009). Estos métodos son: respuesta en escalón y respuesta en frecuencia. A continuación se describe el método de respuesta en frecuencia, por ser el utilizado en este proyecto.

Se conecta el controlador al proceso, y se establecen los parámetros de forma que la acción de control sea puramente

proporcional ( $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ ). Se aumenta lentamente la ganancia hasta que el proceso comienza a oscilar. Cuando esto ocurre, se tiene la ganancia  $K_u$  y el período de la oscilación  $T_u$ . Luego mediante la tabla 1 se determinan los parámetros del controlador.

Controlador	$K/K_u$	$T_i/T_u$	$T_d/T_u$	$T_p/T_u$
P	0,5			1,0
PI	0,4	0,8		1,4
PID	0,6	0,5	0,125	0,85

Tabla 1: Parámetros del controlador para el método de respuesta en frecuencia de Ziegler-Nichols

El método de la respuesta en frecuencia es un procedimiento de sintonía empírico donde los parámetros del controlador se obtienen por experimentos directos sobre el proceso combinado con algunas reglas sencillas. Para un controlador proporcional la regla es simplemente aumentar la ganancia hasta que el proceso oscile y entonces reducir la ganancia en un 50 por ciento.

### G. Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)

Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, más conocidos como SCADA (por su acrónimo en inglés supervisory, control and data adquisición), están conformados por terminales remotas que colectan datos de campo enviándolos a una estación maestra mediante un sistema de comunicación. La estación maestra muestra la data adquirida y permite que el operador realice tareas de supervisión y mando de manera remota (Bailey y Wright, 2003). Rodríguez (2013) refiere que los sistemas SCADA están conformados por los siguientes elementos básicos: Interfaz Hombre-Máquina (HMI), Unidad Central (MTU), Unidad Remota (RTU) y Sistema de Comunicación.

El HMI es un software que se ejecuta en un computador y que permite que los operadores interactúen y controlen los dispositivos y máquinas que están conectados con el sistema.

En el MTU (Master Terminal Unit) se realiza, principalmente, la tarea de recopilación y archivado de datos; poniendo toda la información que se genera en el proceso productivo, a disposición de los usuarios que la requieran. La MTU está conformada por equipos informáticos que se encargan de: gestión de comunicaciones, recopilación de datos de las RTU, envío de información, comunicación con operadores, análisis, tendencias, impresión, visualización de datos, mando y seguridad. Existen tres componentes de software en la MTU: el sistema operativo, el software del sistema SCADA, y el software de la aplicación del SCADA.

El RTU (Remote Terminal Unit) es un conjunto de elementos dedicados a labores específicas de control y/o supervisión de un sistema, el cual está alejado del centro de control y comunicado

con éste por medio de un canal de comunicación. En este componente, se encuentran los siguientes elementos:

- RTU (Remote Terminal Unit): especializado en comunicación.
- PLC (Programmable Logic Controller): tareas generales de control.
- IED (Intelligent Electronic Device): tareas específicas de control.

Los PLC han ido evolucionando con el tiempo, incorporando cada vez más prestaciones en forma de módulos de ampliación, entre ellos los módulos de comunicación, que han hecho desvanecerse la línea divisoria entre RTU y PLC, quedando incluidas todas las prestaciones en el PLC.

El sistema de comunicación comprende los diferentes estándares y protocolos de comunicación entre la MTU y los RTUs; y a nivel de campo, se lo realiza con el uso de las redes de campo industriales.

Para Pérez (2015), el sistema SCADA más sencillo es el compuesto por un único ordenador, que supervisa toda la estación.

#### IV. DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

El proyecto inicia con el diseño del diagrama de tubería e instrumentación (P&ID), el cual se muestra en la figura 3.

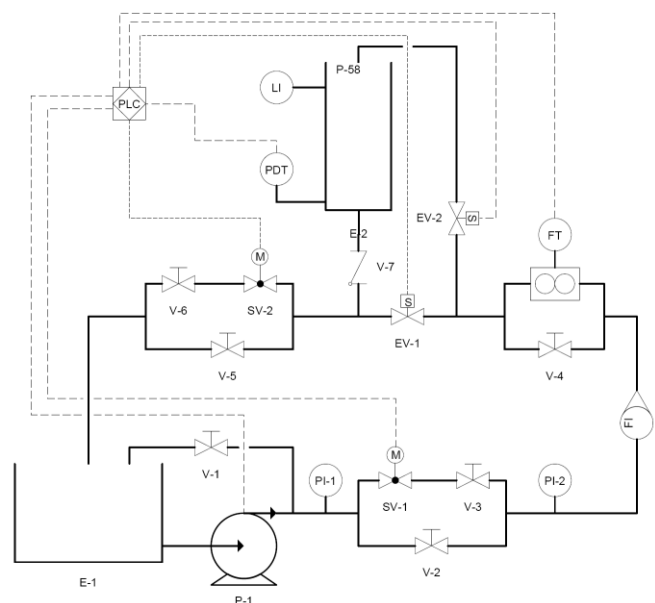


Figura 3: Diagrama de Tubería e instrumentación (P&ID) del módulo didáctico.

El módulo didáctico consta de dos tanques: uno de almacenamiento y el otro que es el tanque principal en el cual se realiza la medición y control de nivel de agua. Existe un PLC que se encarga de realizar las diferentes técnicas de control.

Existe una bomba que se encarga de impulsar el agua desde el tanque de reserva de dos formas: hacia el tanque principal para realizar control de nivel, o mediante un circuito de retorno al mismo reservorio de agua para hacer control de caudal.

El actuador principal del sistema es una válvula de control comercial, con la cual se realiza el control de nivel y caudal del líquido. Por medio de dos electroválvulas, el operador puede escoger la variable que desee controlar, ya sea nivel o caudal.

Para medir caudal, se utiliza un medidor tipo turbina y para medir nivel se utiliza un sensor de presión diferencial, cuyas señales son acondicionadas con circuitos electrónicos analógicos, para después ser ingresadas a los módulos del PLC.

Para el monitoreo y control se tiene dos opciones: 1) el control local, ubicado en el panel frontal de operador del módulo, el mismo que consta de una pantalla de visualización (LCD) y un teclado matricial; 2) el control remoto desde una PC, en la cual se tiene un HMI desarrollado en Intouch.

Los componentes del proceso contemplados en el diagrama P&ID, y sus características, se muestran en la tabla 2.

Código en P&ID	Número en Módulo	Descripción	Características
E-1	6	Tanque de reserva	91609 cm <sup>3</sup> de capacidad
E-2	7	Tanque de control de nivel	14500 cm <sup>3</sup> de capacidad
P-1	5	Bomba centrífuga	1f, 0.5 Hp, 120 Vac
PI-1	11.1	Manómetro indicador de presión	0 - 100 psi
PI-2	11.2	Manómetro indicador de presión	0 - 100 psi
FI	10	Rotámetro indicador de caudal	0 - 5 g.p.m.
FT	9	Medidor de caudal tipo turbina	0,8 - 6 g.p.m, salida de frecuencia
LI	7	Cinta métrica indicadora de nivel	0 a 53 cm (del 0 al 100%)
PDT	17	Sensor transmisor de presión diferencial	0 - 50 KPa , salida 0,2 – 4,7 V
SV-1	4	Válvula de control principal	1 – 5 Vdc o 4 – 20 mA
SV-2	2	Válvula de perturbaciones	Motor de pasos: 6 Vdc @ 1,2 A, 1,8 grados por paso
EV-1	8.1	Electroválvula para modo control de caudal	120 Vac, 60Hz
EV-2	8.2	Electroválvula para modo control de nivel	120 Vac, 60Hz
PLC	14	Controlador Lógico Programable	120 Vac, 60Hz. 10 entradas digitales, 9 salidas digitales, 2 módulos de entradas y salidas analógicas

Tabla 2: Componentes del proceso y características

El siguiente paso fue especificar y adquirir los equipos y componentes del módulo didáctico, para posteriormente

realizar la construcción y el armado del mismo. En la figura 4 se muestra el módulo construido y sus componentes.

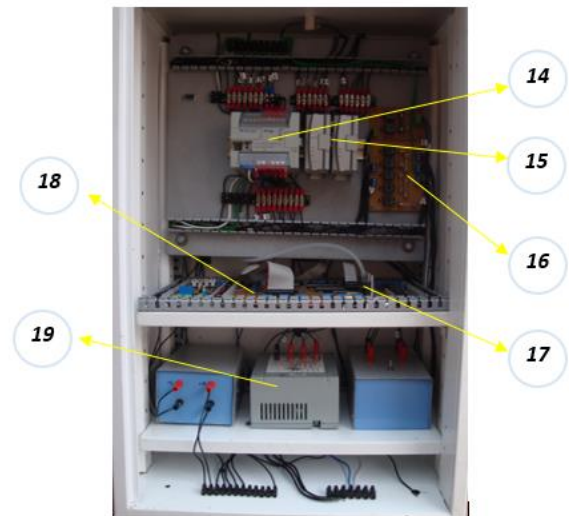
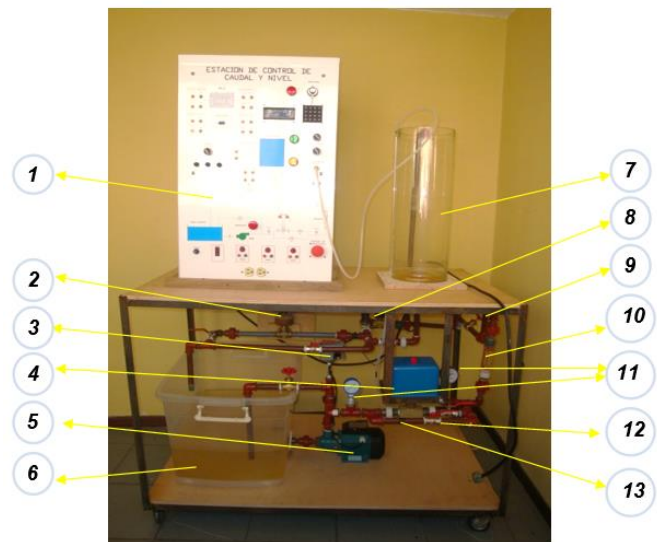


Figura 4: Componentes del módulo didáctico.

El modulo tiene la capacidad de poder ser operado tanto localmente, como a través de un HMI desarrollado y ejecutado en una PC. A continuación se describen los componentes principales del módulo de control de caudal y nivel de líquidos.

#### A. Sensor de presión diferencial

Para medir nivel se utilizó la técnica de medición de presión diferencial, con los siguientes valores del proceso:  $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$  (por ser agua),  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , y  $h_{\text{máxima}} = 0.58 \text{ m}$  (altura máxima del tanque de control)

Reemplazando en la ecuación (2) se tiene la diferencia de presión máxima:

$$\Delta P = 1000 \times 9.8 \times 0.58$$



$$\Delta P = 5684 \text{ Pa} = 5.68 \text{ KPa}$$

Debido a que  $1 \text{ psi} = 6.8956 \text{ KPa}$ , se tiene entonces el  $\Delta P = 0.824 \text{ psi}$

En el módulo se instaló el sensor transductor MPX5050GP de la marca Freescale Semiconductor que se muestra en la figura 5.

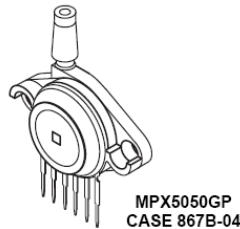


Figura 5: Sensor transductor de Presión Diferencial

El MPX5050GP es un transductor piezoresistivo que mide la presión relativa con respecto a la presión atmosférica (Gage Pressure), es decir, que mide directamente la presión de empuje que ejerce el agua en la base del recipiente por medio de una sonda de aire. Se escogió este sensor por su bajo costo y por su disponibilidad en el mercado local.

El sensor tiene las siguientes características:

- Rango de presión relativa: de 0 a 50 KPa (de 0 a 7.25 psi).
- Rango de voltaje de salida: de 0.2 a 4.7 Vdc
- Precisión:  $\pm 2.5 \% V_{FSS}$  para una temperatura entre 0 a 85 °C
- Tiempo de respuesta: 1.0 ms

En la figura 6, se muestra la función de transferencia del sensor que da el fabricante. Se observa que el sensor tiene un comportamiento lineal, lo cual es ventajoso.

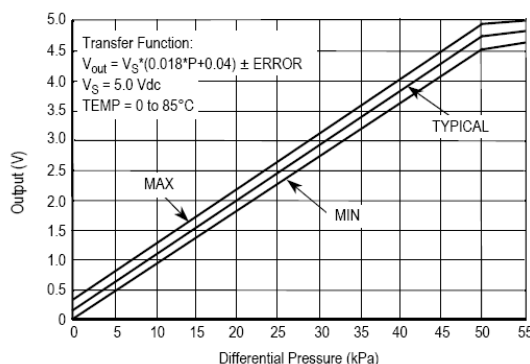


Figura 6: Función de transferencia del sensor transductor de presión diferencial

La máxima presión relativa en la entrada del sensor es  $\Delta P = 0.824 \text{ psi}$ . Esta presión equivale a la presión hidrostática producida por el agua en el máximo nivel del tanque. El voltaje de salida del sensor a dicha presión es  $V_{\text{sensor}} = 534.18 \text{ mVdc}$ .

Para amplificar esta señal se utiliza el circuito que se muestra en la figura 7.

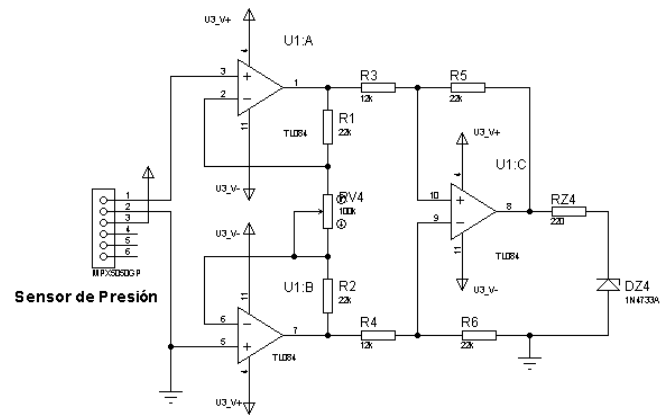


Figura 7: Circuito de acondicionamiento del sensor de presión diferencial para conexión con el PLC.

El circuito consiste de un amplificador de instrumentación cuya ganancia puede ser regulada mediante un potenciómetro de precisión. Al final del circuito se utiliza un diodo zener con su respectiva resistencia de protección, esto sirve para proteger la entrada analógica del PLC donde ingresa la señal acondicionada de 0 a 5 Vdc.

#### B. Medidor de caudal tipo turbina

El caudalímetro tipo turbina seleccionado es de la marca Proteus Industries Inc. El sensor es serie 303, y el transductor serie 100, y tiene las siguientes características:

- Rango de caudal desde 0.8 hasta 6 galones por minuto
- Presión hasta 75 PSI
- Salida de pulsos de frecuencia variable y relación de trabajo constante
- Alimentación de voltaje DC
- Temperatura del fluido desde -45 hasta 75 grados centígrados.
- Conexiones para tubería de 1/4 de pulgada.
- Cuerpo es de material celcon.

Este medidor utiliza el principio tipo turbina para generar una salida de frecuencia proporcional al flujo de líquido a través del mismo. Estos medidores pueden medir caudal desde 0.8 hasta 6 galones por minuto, lo que es suficiente para los fines didácticos del módulo. En la figura 8 se muestra el medidor y su funcionamiento

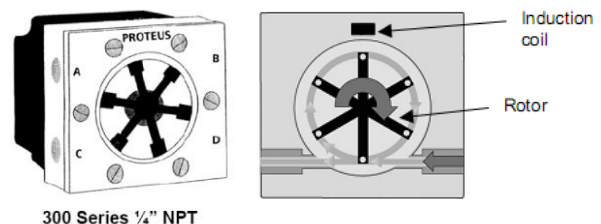


Figura 8: Medidor de caudal tipo turbina y su funcionamiento

Cuando el líquido ingresa al medidor, un rotor que se encuentra en el interior del sensor gira. En el cuerpo del rotor se encuentran imanes los cuales, cuando el rotor gira, inducen un voltaje en una pequeña bobina que se encuentra en el cuerpo del sensor. El voltaje inducido alcanza su máximo valor cuando el imán se encuentra inmediatamente adyacente a la bobina. La frecuencia y la amplitud del voltaje inducido son proporcionales a la velocidad rotacional del rotor y a la velocidad lineal del líquido que pasa a través del cuerpo del sensor. El voltaje inducido es medido por un circuito electrónico simple, el cual compara su valor con el voltaje  $V_{cc}$  al que se encuentre conectado el medidor, generando de esta manera una salida de pulsos en la que la relación de trabajo es constante pero cuya frecuencia depende de la velocidad del rotor.

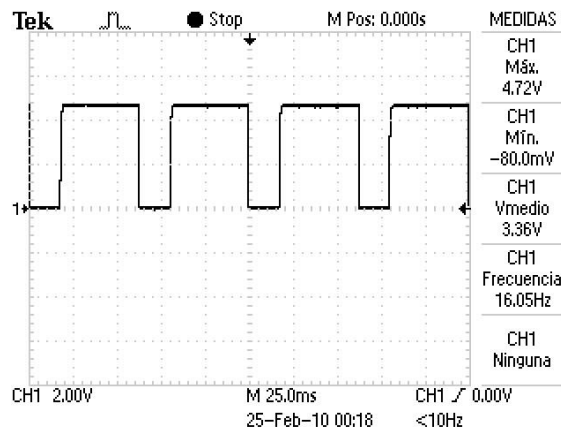


Figura 9: Salida de pulsos del medidor tipo turbina, para un caudal de 1.4 g.p.m.

En la figura 10 se muestra la curva del medidor de caudal tipo turbina (en línea cortada), la cual tiene un comportamiento lineal.

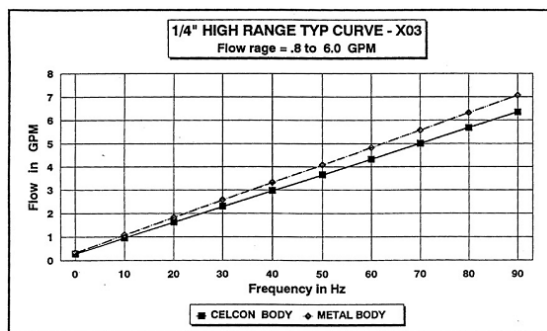


Figura 10: Curva del medidor de caudal tipo turbina

Para poder llevar la señal de frecuencia del medidor a la entrada analógica del PLC, se implementó el circuito de la figura 11.

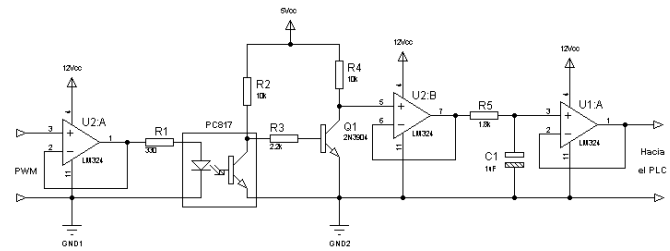


Figura 11: Circuito de acondicionamiento del medidor de caudal para conexión con el PLC.

El optoacoplador PC817 cumple la función de aislar la salida del medidor con la entrada analógica del PLC. Para evitar las caídas de tensión y para acoplar impedancias en cada una de las etapas, se utilizan seguidores de tensión implementados con el amplificador operacional LM324. La señal de frecuencia se invierte luego del optoacoplador, y para volver a invertir esta señal se utiliza un transistor NPN 2N3904. Finalmente la señal necesita pasar por un filtro pasivo RC para tener una señal entre 0 a 5 Vcc, lista para ingresar al módulo de entrada analógica del PLC.

### C. Rotámetro

Se utiliza un rotámetro para tener una indicación del caudal de manera local. El rotámetro seleccionado es fabricado por la casa Omega Engineering Inc. y pertenece al modelo FL-72.



Figura 12: Rotámetro

Sus características principales son las siguientes:

- Medición de caudales de hasta 5 galones por minuto.
- Cuerpo de acrílico.
- Terminales roscadas para conexión de tuberías de ½ pulgada.
- Montaje vertical
- Máxima presión: 125 psig (a 21 °C)
- Máxima temperatura: 54 °C (a 0 psig)

#### D. Válvula de Control

Para la selección de la válvula de control se consideraron los siguientes parámetros:

- El tipo de fluido que se utiliza es agua
- La presión máxima ejercida por la bomba a la entrada de la válvula es de 50 psi (para medir esta presión se utiliza un manómetro colocado antes de la válvula).

- El caudal máximo en la tubería es de 3 GPM (para medir este caudal se utiliza el rotámetro).
- Debido a que los transductores de nivel y caudal tienen un comportamiento lineal, la válvula de control debe ser también de comportamiento lineal.

Bajo estas condiciones se instaló una válvula proporcional de control electrónico modelo PV-14B fabricada por Omega Engineering Inc. que se muestra en la figura 13.

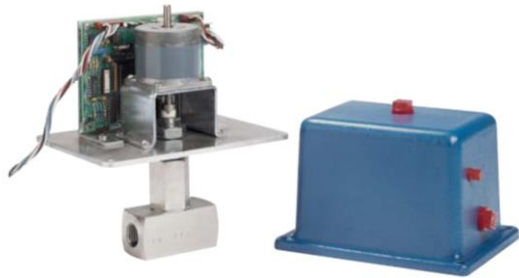


Figura 13: Válvula de control

Características de la válvula:

- Tipo de válvula: Válvula de globo lineal
- Aplicación: Para líquidos y gases
- Material: Cobre
- Diámetro de prueba: ½ pulgada
- Presión: 120 psi máximo
- Caudal: 4 GPM (15.14 l/min) a 50 psi
- Cv de la válvula: 0.6

Características del actuador:

- Tipo de actuador: Motor DC de pasos de 200 pasos por revolución
- Velocidad: 45 rpm
- Fuente de poder: 12–24 Vdc @ 2 A no regulada
- Señal de control: 4-20 mA o 0-5 Vdc. Escogido por el usuario
- Temperatura de operación: 0 a 49 °C

#### E. Electroválvulas

Para seleccionar entre control de caudal, o de nivel de agua, se han instalado dos electroválvulas. La figura 14 muestra la electroválvula seleccionada.



Figura 14: Electroválvula

Las electroválvulas instaladas tienen las siguientes características técnicas:

- Marca: ODE
- Modelo: 21H8KB120
- Aplicación: Para agua caliente o fría
- Tipo de válvula: NC (normalmente cerrada) de 2 vías
- Diámetro: ½ pulgada
- Presión de trabajo mínima: 0,1 bar
- Presión de trabajo máxima: 20 bar
- Fuente de alimentación: 120 Vac a 60 Hz

#### F. Servoválvula de perturbaciones

Para poder generar perturbaciones desde el HMI de la PC, se construyó una servoválvula, considerando que este elemento no debe ser exacto ni preciso, ya que la naturaleza de una perturbación es impredecible y desconocida.

La servoválvula de perturbaciones consta de una válvula de globo doméstica, un actuador con motor de pasos, y el acoplamiento entre ambos. La servoválvula construida se muestra en la figura 15.



Figura 15: Servoválvula de perturbaciones

La válvula de globo tiene terminales para conexión de tuberías de ½ pulgada. El actuador es un motor de pasos que tiene las siguientes características:

- Unipolar
- Resolución de 1.8 grados por paso
- Alimentación de 6 Vdc
- Corriente de 1.2 Amperios a plena carga

El acoplamiento tiene la función de transmitir el movimiento rotacional del rotor del motor de pasos hacia el eje de la válvula de globo para lograr la apertura y cierre de la misma. El material con el que fue construido es madera, debido a su bajo costo y facilidad de manipulación.

#### G. Bomba centrífuga

El módulo requiere de una bomba que se encargue de impulsar el agua a una determinada presión y caudal. Los parámetros más importantes a considerar para seleccionar una bomba son los siguientes:

- Caudal requerido.



- Cabeza requerida (este aspecto está fuertemente influenciado por las características del sistema).
- Fluido a bombear.
- Temperatura del fluido.

En este caso se seleccionó una bomba centrífuga marca PAOLO cuyas características se muestran a continuación:

- Modelo: PKM60-1
- Caudal máximo: 40 L/min
- Cabezal máximo: 40 m
- Altura máxima de succión: 9 m
- Potencia: 0.5 Hp
- Diámetro bomba: 1"×1"
- Peso neto: 5.3 Kg
- Dimensión general: 265 \*120\*155 mm

En la siguiente figura 16 se muestra la bomba instalada:



Figura 16: Bomba centrífuga

#### H. Presostato

El presostato o también conocido como interruptor de presión, es un aparato que abre o cierra un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido.



Figura 17: Presostato o interruptor de presión.

La necesidad de utilizar un presostato radica en proteger al sistema de sobrepresiones que puedan ocasionar daños. El presostato instalado en el módulo es de marca PAOLO y consta de dos tornillos que permiten ajustar la presión de encendido (presión mínima) y la presión de apagado (presión máxima). La señal del presostato es enviada a una entrada digital del PLC para que éste realice la acción de control pertinente cuando el presostato actúe. La figura 17 se muestra el presostato.

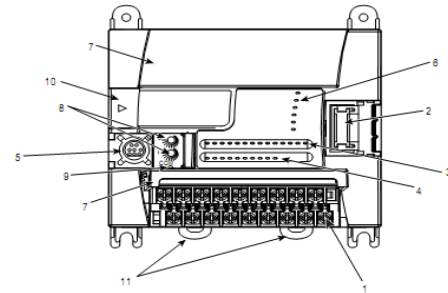
#### I. PLC y módulos de entrada y salida

El controlador principal del módulo es un PLC de marca Allen Bradley de Rockwell Automation, modelo Micrologix 1200 1762-L24AWA, que se muestra en la figura 18.



Figura 18: PLC Allen Bradley Micrologix 1200

La alimentación general del PLC es de 120/240 VAC. Cuenta con un puerto RS-232 que sirve de canal de comunicación con el PC. La programación se la realiza con el software RS Logix 500 de Allen Bradley. Las partes constitutivas del PLC se muestran en la figura 19.



Item	Descripción	Item	Descripción
1	Bloques de terminales (Bloques de terminales extraíbles 1762-L40XWA y 1762-L40BXB, solamente)	7	Puertas y etiquetas del terminal
2	Interface de conector de bus a E/S de expansión	8	Potenciómetros de ajuste
3	Indicadores LED de entrada	9	Botón pulsador conmutador de comunicaciones
4	Indicadores LED de salida	10	Cubierta de puerto de módulo de memoria <sup>(1)</sup> -o bien- módulo de memoria y/o reloj en tiempo real <sup>(2)</sup>
5	Puerto de comunicación/ Canal 0	11	Seguros de riel DIN
6	Indicadores LED de estado		

Figura 19: Partes constitutivas del PLC

Para poder efectuar las diferentes tareas, en los distintos modos de control, el PLC dispone de 14 entradas digitales. Estas entradas se encuentran distribuidas en dos grupos, cada grupo cuenta con un terminal común independiente. El primer grupo tiene en total 4 entradas digitales y el segundo 10, como se muestra en la figura 20.

En este proyecto se utiliza el grupo 1 en función de la siguiente distribución:

- I:1/4: Selección de entrada de set point (para diferenciar si a través del canal analógico respectivo se tiene set point de caudal o nivel)
- I:1/5: Señal de sobrepresión (presostato)
- I:1/6: Selector de mando (Marcha-Paro)
- I:1/7: Selector de modo (Manual-Automático)
- I:1/8: Selector de controlador (Local-PC)

- I:1/9: Selector de modo de control (ON/OFF-PID)
- I:1/10: Accionador de paro de emergencia
- I:1/11: Entrada auxiliar para panel de control
- I:1/12: Entrada auxiliar para panel de control

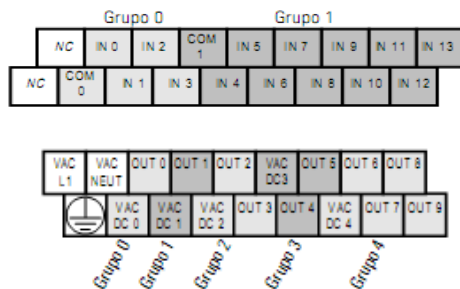


Figura 20: Entradas y salidas digitales del PLC

Además, el PLC tiene incorporado un total de 9 salidas digitales tipo relé, las cuales se encuentran distribuidas en 5 grupos cada uno con su terminal común. Cada una de estas salidas puede cerrar circuitos cuyas fuentes de alimentación pueden ser de corriente continua o alterna según la necesidad. En este caso se utilizó 4 grupos disponiendo de un total de 8 salidas digitales las mismas que fueron utilizadas en la forma que se detalla a continuación:

- O:1/1: Encendido/Apagado de Bomba
- O:2/2: Cierre de servoválvula de perturbación
- O:2/3: Apertura de servoválvula de perturbación
- O:3/4: Mando electroválvula modo control caudal
- O:3/5: Mando electroválvula modo control nivel
- O:4/6: Luz indicadora de Marcha-Paro
- O:4/7: Luz indicadora de Sobrepresión
- O:4/8: Luz indicadora de Sobrenivel
- O:4/9: Luz indicadora de Subnivel

Para el manejo de señales analógicas se utilizaron dos módulos: el 1762-IF2OF2 y el 1762-IF4.

El módulo 1762-IF2OF2 cuenta con dos entradas y dos salidas analógicas. Las entradas analógicas cuentan cada una con dos terminales de conexión (referencia/común y señal de entrada), además cuentan con un par de interruptores los cuales permiten seleccionar el tipo de entrada (corriente: 4-20 mA, o voltaje: 0-10 Vdc), se tiene un interruptor por cada canal.



Figura 21: Módulo 1762-IF2OF2 de entradas/salidas analógicas

Las salidas cuentan con un terminal de referencia que es común para ambos canales y también se tiene la opción de seleccionar el tipo de salida (ya sea de corriente o voltaje), para ello se debe

hacer las conexiones adecuadas en las terminales correspondientes y configurar el módulo vía software.

El módulo 1762-IF4 dispone de cuatro entradas analógicas que permite entrada de corriente de 4 a 20 mA, o de voltaje de -10 a +10 Vdc. Cada uno de estos canales cuenta con un interruptor de selección del tipo de señal de entrada, y con dos terminales de conexión (referencia/común y señal de entrada).

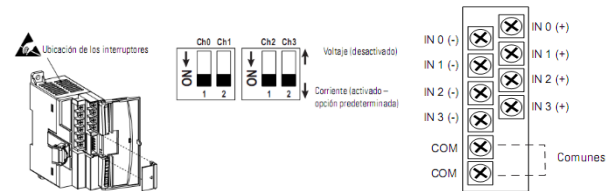


Figura 22: Módulo 1762-IF4 de entradas analógicas

Entre los dos módulos de expansión se tiene un total de 6 entradas analógicas, cada una de ellas cumple con funciones específicas que se describen a continuación.

- I:1.0: Entrada de medidor de caudal tipo turbina
- I:1.1: Entrada de sensor de presión diferencial (nivel de agua)
- I:2.0: Potenciómetro parámetro Kc del PID
- I:2.1: Potenciómetro parámetro Ti del PID
- I:2.2: Potenciómetro parámetro Td del PID
- I:2.3: Punto de consigna (set point) de caudal o nivel

Para conectar al PLC los potenciómetros de los parámetros Kc, Ti y Td del controlador PID, se desarrolló el circuito mostrado en la figura 23.

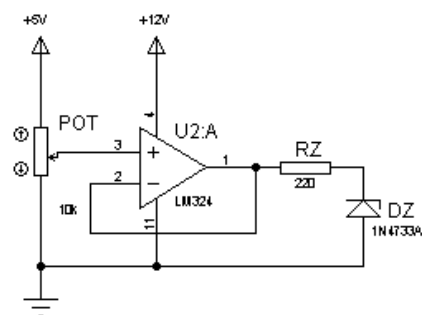


Figura 23: Circuito de acondicionamiento de los potenciómetros para ingreso de parámetros del PID, para conexión con el PLC.

Se utilizan seguidores de tensión con el amplificador operacional LM324 y diodos zener 1N4733A de 5,1Vdc para proteger las entradas analógicas del PLC.

### J. Sistema SCADA.

El desarrollo del sistema SCADA se lo realiza con la suite Wonderware FactorySuite 2000, la cual permite la recolección, visualización, almacenamiento, control, análisis y gestión de la información obtenida de una planta industrial. La suite está

principalmente compuesta por los siguientes sistemas, que proveen de servicios específicos:

- InTouch <sup>TM</sup>, para desarrollo de HMI.
- InTouch <sup>TM</sup>, para control por computador de máquinas y procesos industriales.
- Industrial <sup>TM</sup> Server, para desarrollo de base de datos relacional en tiempo real.
- Scout <sup>TM</sup>, herramienta robusta para la visualización remota de datos a través del internet o intranet.
- InTrack <sup>TM</sup>, para la gestión de recursos.
- InBatch <sup>TM</sup>, para la gestión flexible de lotes.
- I/O Server, para conectar los paquetes de FactorySuite 2000 con los datos del proceso.

Como se observa, Wonderware FactorySuite 2000 es toda una infraestructura para implementar desde simple hasta complejos sistemas SCADA. Para el presente proyecto se utilizan los paquetes Wonderware InTouch y Wonderware I/O Servers.

Wonderware InTouch, es una herramienta para desarrollo de HMIs, que proporciona una visión integral de todos los recursos de control e información. InTouch permite a ingenieros, supervisores, gerentes y operadores visualizar e interactuar con el funcionamiento de una operación completa a través de representaciones gráficas de sus procesos de producción. Las principales características de InTouch son: gráficos orientados a objetos, enlaces animados, scripts, alarmas y eventos; y, tendencia histórica y en tiempo real. Para el desarrollo y ejecución de HMIs, InTouch consta básicamente de dos elementos: WindowMaker, que es el sistema de desarrollo; y WindowViewer, que es el sistema runtime utilizado para ejecutar las aplicaciones creadas con Windowmaker. En lo relacionado a comunicaciones, InTouch usa Microsoft Dynamic Data Exchange (DDE), NetDDE y los protocolos de Wonderware SuiteLink, para comunicarse con otros programas de Windows. Para comunicarse con el mundo real, utiliza Wonderware I/O Servers e I/O Servers de Terceros.

Wonderware I/O Servers, incluye una amplia lista de servidores de entradas/salidas, para interconectar los componentes de FactorySuite 2000 con los controladores de diferentes marcas como Allen-Bradley, Siemens, Modicon, Opto 22, Square D y otros. Una vez que el I/O Server ha sido instalado, se requiere configurarlo. Esta configuración se almacena de forma automática en la carpeta de instalación del I/O server. Para el caso de este proyecto, el I/O server utilizado es el ABKF2, mediante el cual se accede a datos de PLCs Allen Bradley.

InTouch soporta aplicaciones stand-alone y aplicaciones distribuidas. Una aplicación stand-alone es aquella en donde se utiliza un único HMI para un sistema de monitoreo, estas aplicaciones generalmente son fáciles de configurar, con un componente mínimo o nulo de redes informáticas, y requieren de un mantenimiento sencillo. Por otro lado, las aplicaciones distribuidas son mucho más complejas y con una gran infraestructura de redes informáticas. Las aplicaciones distribuidas, generalmente, tienen una estación de desarrollo central, almacenamiento de datos central y múltiples estaciones clientes que interactúan entre ellas y con la estación central. El

presente proyecto es una aplicación stand-alone con una única PC donde se ejecutan los programas y aplicaciones antes descritas

El HMI desarrollado, consta de: pantalla de presentación, pantalla principal, pantalla de gráficas de tendencia y pantalla de alarmas; las mismas que aparecen de acuerdo a los requerimientos del usuario y a las condiciones en que se encuentra el proceso, tal como se muestra en la figura 24.

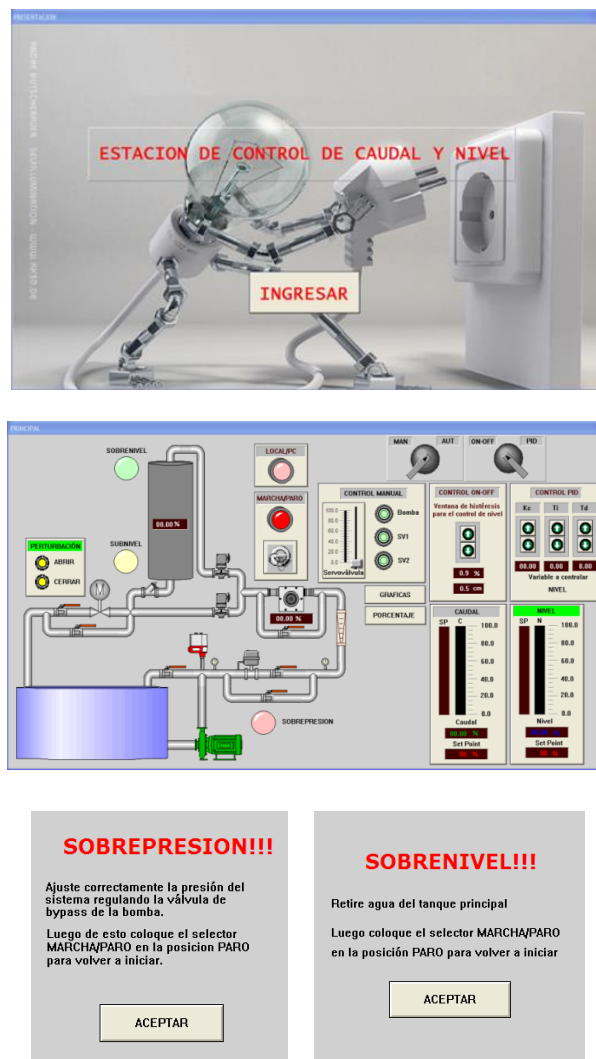


Figura 24: Pantallas del HMI desarrollado en InTouch

En la pantalla principal, el operador puede realizar actividades de visualización del estado de los actuadores y sensores, cambio de parámetros, cambio de tipo de control, selección de variable a controlar y modificación de set point. Tiene la posibilidad de cambiar la forma en que se presentan los datos (unidades o porcentaje), acceder a las ventanas de gráficas de tendencia del proceso, visualizar alarmas de sobrenivel, sobrepresión y subnivel con la ayuda de luces indicadoras, manipular la servoválvula de perturbaciones. El operador dispone además de un diagrama esquemático de la planta y del selector de Marcha/Paro el mismo que funciona solamente cuando la luz indicadora señala el Modo PC.

## V. RESULTADOS

### A. Control PID de nivel

El control PID de nivel se lo realiza desde la PC utilizando el HMI, para aprovechar la herramienta de graficas de tendencias. Para esto se coloca el selector del panel de control Local/PC en modo PC. La señal de control del algoritmo PID ejecutado en el PLC, se la aplica a la válvula de control. La bomba permanece encendida durante el control. La electroválvula que permite el flujo de agua hacia el tanque principal permanece abierta y la electroválvula que permite el flujo de agua hacia el tanque de reserva permanece cerrada. Se abre totalmente la válvula de salida para tener el mayor caudal de consumo, simulando así la máxima demanda.

Para la obtención de parámetros y sintonización del algoritmo de control PID de nivel, se utiliza el método de Ziegler-Nichols descrito en el capítulo 2.F.; teniendo los siguientes valores:  $K_c=8$ ,  $T_i=0,4$  y  $T_d=0,01$ . Luego de sintonizar el PID, se realizan dos pruebas: la primera consiste en variar el punto de consigna (set-point), y la segunda en generar perturbaciones en el sistema (manipulando la servoválvula de perturbaciones en los momentos 1, 2, 3 y 4); en ambos casos se observa el comportamiento del sistema, tal como se muestra en la figura 25.

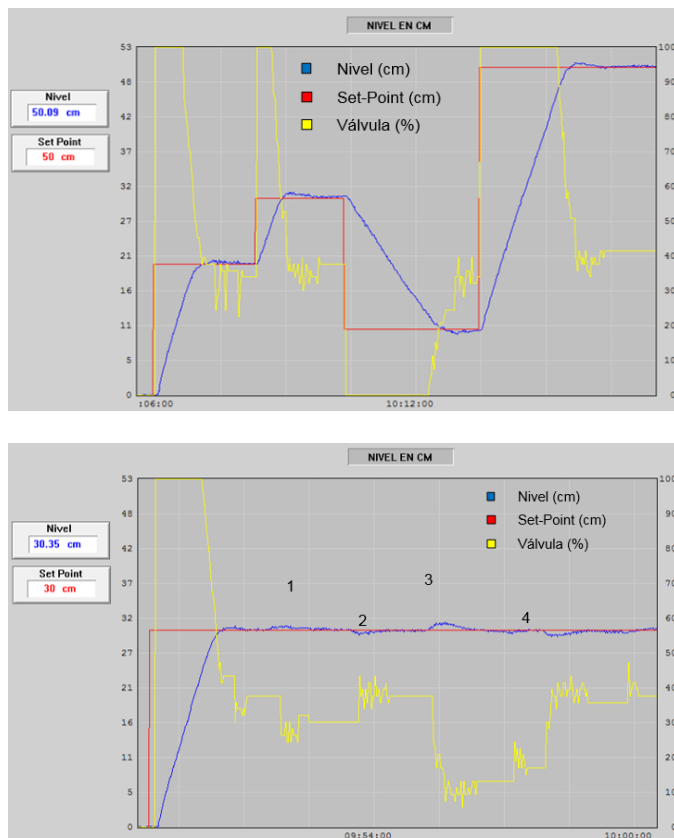


Figura 25: Control PID de nivel. Respuesta del sistema ante cambios de set-point y perturbaciones.

### B. Control PID de caudal

El control PID de caudal también se lo realiza desde el HMI del PC. La señal de control del algoritmo PID ejecutado en el PLC, se la aplica a la válvula de control. La bomba permanece encendida durante el control. La electroválvula que direcciona el flujo de agua hacia el tanque principal está cerrada y la electroválvula que direcciona el flujo de agua hacia el tanque de reserva está abierta, se abre totalmente la servoválvula generadora de perturbaciones.

Para la sintonización del algoritmo PID, se utiliza el mismo método que para sintonizar el control PID de nivel, teniendo los siguientes valores:  $K_c=0,2$ ,  $T_i=0,08$  y  $T_d=0$ . Luego de sintonizar el PID, se realizan dos pruebas: la primera consiste en variar el punto de consigna (set-point), y la segunda en generar perturbaciones en el sistema (manipulando la servoválvula de perturbaciones en los momentos 1, 2, 3 y 4); en ambos casos se observa el comportamiento del sistema, tal como se muestra en la figura 26.

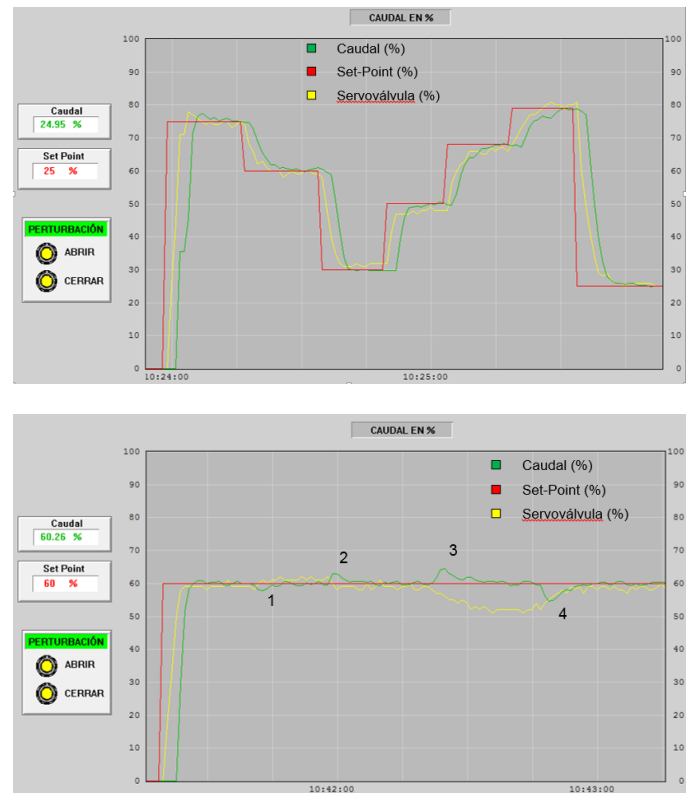


Figura 26: Control PI de caudal. Respuesta del sistema ante cambios de set-point y perturbaciones.

## VI. CONCLUSIONES

Con el módulo didáctico se logra comprender de manera práctica y holística, los conceptos relacionados con sistema de control, instrumentación, medición, actuador, controlador, algoritmo de control; y el funcionamiento de sistemas de control industriales como PLC y SCADA.



Específicamente, se ejecutaron controles PID de dos de las variables más frecuentes en la industria, nivel y caudal; teniendo resultados favorables.

En el control de nivel, se logró sintonizar un PID que permitió tener una buena respuesta del sistema tanto en estado transitorio como estacionario; observándose un buen tiempo de respuesta, sobrepico pequeño y error de posición muy bajo.

Para la variable caudal, un control proporcional – integral (PI) es suficiente, ya que al introducir el componente derivativo, se observó que en estado estacionario aumenta la variabilidad del caudal con respecto al set-point. Si bien es cierto, el componente derivativo reduce el sobrepico en estado transitorio, puede volver un poco inestable al sistema en estado estacionario.

## REFERENCIAS

Astrom, J. y Hagglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Primera Edición, Madrid: Pearson Educación S.A.

Bailey, D. y Wright, E. (2003). *Practical SCADA for Industry*. Great Britain: IDC Technologies.

Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial*, Octava Edición. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A.

Emersons. *Control Valve Handbook*, Cuarta Edición. Obtenido de: <https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf> (Junio, 2019).

Invensys Systems, Inc. *Wonderware® FactorySuite™: Intouch® User's Guide*. Obtenido de: <https://kishorekaruppaswamy.files.wordpress.com/2011/10/intouch-wonderware-manual.pdf> (Septiembre, 2005).

Liptak, B. G. (2003). *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*, Cuarta Edición. Boca Ratón, Florida: CRC Press.

Love, J. (2007). *Process Automation Handbook: A Guide to Theory and Practice*. London: Springer.

National Instruments. *Efectos de las Componentes Proporcional, Integral y Derivativa de un Algoritmo PID en la Respuesta de un Sistema*. Obtenido de: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/CCA38D5809BE9DF686257D9700679E22> (Noviembre, 2014).

Pérez, E. Los sistemas SCADA en la automatización industrial. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre - Diciembre. Costa Rica. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/287151597\\_Los\\_sistemas\\_SCADA\\_en\\_la\\_automatizacion\\_industrial](https://www.researchgate.net/publication/287151597_Los_sistemas_SCADA_en_la_automatizacion_industrial) (Diciembre, 2015).

Oagata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*, Quinta Edición. Madrid: Pearson Educación, S.A.

Rockwell Automation. *MicroLogix 1200 Programmable Controllers: User Manual*. Obtenido de: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1762-um001\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1762-um001_-en-p.pdf) (Junio, 2015).

Rodríguez, A. (2013). *Sistemas SCADA*, Tercera Edición. Barcelona: Editorial Marcombo.

Wonderware Corporation. *Wonderware® Allen Bradley® Serial I/O Server: User's Guide*. Obtenido de: [https://www.logic-control.com/media/IOSrv\\_ABKF2.pdf](https://www.logic-control.com/media/IOSrv_ABKF2.pdf) (Abril, 2001).

Wonderware Corporation. *Wonderware® FactorySuite™. System Administrator's Guide*. Obtenido de: <https://se4f785c805712c1e.jimcontent.com/download/version/1340792734/module/5702187819/name/FSADMINUG.pdf> (Diciembre, 1997).

## AUTOR



**Rogger José Andrade Cedeño.** Nacido el 02 de enero de 1985 en la ciudad de Chone, provincia de Manabí, Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (2010). Obtuvo el título de Magister en Gestión de la Calidad en la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador (2017). Profesionalmente, se ha desempeñado en proyectos y operaciones relacionadas a la industria de producción, transporte y refinación de petróleo; así como también, en sistemas de transporte de agua.